フダンソウの乾物生産に対する炭酸ガス濃度と栽培密度の影響*

矢 吹 万 寿・田 村 順 介・織田 弥三郎・今 津 正

(大阪府立大学 農学部)

The Effect of Carbon Dioxide Concentration of
Atmospheric on Growth of Leaf Beet with Various Plant Densities

K. YABUKI, J. TAMURA, Y. ODA and T. IMAZU,

(College of Agriculture, University of Osaka Prefecture Sakai, Osaka, Japan)

1. 緒 言

筆者らはさきに大気中の CO_2 濃度を高めた場合、フダンソウの乾物重が顕著に増加するが、この増加率が、日本の自然条件下では、 CO_2 濃度と積算日射量とによつて統一されることを報告したが²⁾、この実験においては、栽植密度という概念は全く入っており、むしろ個体としての栽培条件と見做されるものであつた。したがつて作物が生長しても相隣る植物体との重り合いは少く、大きくなつても充分な受光空間を持つているため、乾物重の増加は指数函数的に増加することになつた。しかし実際の作物栽培においては、その繁茂状況から群落生産と考えられる場合も多い。群落と考えた場合は単位面積当りの生産量が問題となるとともに、栽植密度が問題となる。したがつて CO_2 濃度と作物の生育との関係についても、単に個体に対する効果だけではなく、栽植密度を考えた単位面積当りの生産量について考慮する必要がある。従来の研究では群落生産に対し大気中の CO_2 濃度の効果については全く考えられていないが、 CO_2 施用栽培については勿論のこと、群落生産に対しても重要な基礎的な問題と考えられる。

栽植密度を大きくしてゆくと、単位面積当りの乾物重は増大してゆくが、ある程度の密度からはほぼ一定の乾物重に落付きそれ以上にはならなくなる。この現象は一般によく知られ plateau phenomenon と呼ばれている。この乾物量が一定値となる理由については、いろいろと説明されているが、その一つは、ある密度以上になると根から吸収される無機栄養分の量が一定となるためとしているものもあり、気象環境から考えて合理的と見

られるものは、栽植密度が大きくなると植物生育層で吸収される入射エネルギーの量が最大量に達するため、同化量も略一定値に落着くというものである。そしてこの後者の考え方の下に、植物の受光体制とか、群落内の光学的構造などが乾物生産を高めるために盛んに研究されている。

筆者らは炭酸ガス施用栽培の実用化実験において、ホーレンソウ、シュンギクをビニールハウス内で栽培し、炭酸ガス処理を行ない、生育の途中で半分の密度に間引いたところ、収穫時には次章で述べるごとく、対照ハウスでは間引区も非間引区も同一面積内の乾物重には大きい差は見られなかつた。しかし CO_2 処理ハウス内では間引区、非間引区とも乾物重は対照ハウスより高いレベルにはあつたが、間引区は非間引区に比べ、約半分に近い量であつた。この傾向はホーレンソウでもシュンギクでも同様であつて、極めて興味深い結果と考えられた。この現象は前述したとき plateau 現象に対する従来の諸説では説明困難と考えられ、さらにこれを詳細に確めるため精密栽培試験装置を用い、 CO_2 濃度と栽植密度とが作物群落の生産に対しどのような効果を示すものかを調べた。一試験区が狭小という難点もあつたが、その結果は極めて興味深いものがあつたのでこれを報告したい。なおこの実験の実施にあたり、大阪府立大学農学部農業気象環境学研究室、蔬菜学研究室および附属農場の多くの方々の協力を得たことを記し、感謝の意を表わしたい。

2. 間引き実験——精密実験への仮定——

ビニールハウス (30坪) を2棟用い、1棟は対照区、他は CO_2 処理区とし、処理区はプロパンガスを燃焼して

* 昭和40年11月16日農業気象学会西日本大会にて発表

大気中の CO₂ 濃度の約10倍 (3,000 ppm) とし、ホーレンソウおよびシュンギクを栽培した。CO₂ 処理は 9 時から16時までとしたが、この実験は CO₂ 施用栽培の実用化試験であつたので、CO₂ 濃度および処理時間などは次章で述べられる精密実験のごとくには精密ではない。

1964年12月25日に播種、1月18日以降 CO₂ 処理を行ない、両ハウスとも一部を2月22日に栽植密度を半分の間引き、3月5日に収穫した。最終生育状況を第1表に

第1表 密植区と間引区との乾物重比較
(畦長 30cm 当りの乾物量)

区 分	種 類	ホーレンソウ		シュンギク
		ノーベル	バイキング	
対 照 区	密 植	15.8gr	17.5gr	31.6gr
	間 引	13.8	12.0	26.5
試 験 区	密 植	34.1	41.3	44.6
	間 引	19.5	26.1	22.4

掲げる。この表における乾物重とは同一面積内 (二条播きで、長さ 30 cm 当り) の量である。CO₂ 処理区は対照区にくらべ、極めて顕著な CO₂ 処理効果を示し、2～3 倍の収量増加を示している。この結果のうちで興味ある問題の一つは、間引区と非間引区との収量差である。すなわち対照ハウスでは、間引区でも非間引区とその収量には大きい差は見られないが、CO₂ 処理ハウスにおいては間引区の乾物重が非間引区のよれより極端に減少し、約 1/2 になっていることである。この傾向はホーレンソウ・シュンギクの何れにも見られるもので、もし群落内の生産が従来から考えられているように、ある程度の密度を高めた場合、生育層での入射エネルギーの吸収率が一定となり、生育量も栽植密度にかかわらず一定になると考えるならば、CO₂ 処理による生産量の増加は考えられない。CO₂ 濃度を高めることによって同化レベルが高まるにしても、間引区と非間引区との相対的な関係が、対照区と CO₂ 処理区とで異なるという結果は、上述のごとき入射エネルギーの吸収率から説明しようとするのは甚だ困難なように思われる。無機肥料の吸収量説によつても全く同様に説明しがたい。

この実験結果で対照ハウスにおいて間引区と非間引区とに余り大きい収量差のないことは、間引区の繁茂度でもすでに plateau に近くなっているのに対し、処理ハウスでは未だ plateau があらわれていないことを示しているものである。このことは CO₂ 濃度を高めるならば

plateau 現象は現われ難い。逆から考えれば、標準大気では日射量は充分にあり、同化の制限因子とはなっていないが、生育層への CO₂ の補給が不充分であるために plateau 現象が起つていると考えられる。ある密度 (繁茂度) 以上になると CO₂ の生育層への拡散量が一定となると考えるならばこれらの現象が理解出来る。

この実験では CO₂ 濃度および栽植密度は何れも 2 種であつたためこの様な考え方を裏付けることは甚だ困難であるため、次に述べる精密実験により確めることとした。

3. 乾物生産に対する栽植密度と CO₂ 濃度との関係

1. 実験装置 炭酸ガス濃度を一定にして作物を育てるための育成箱はベッド面積 1.5×10m²、深さ30cmの礫耕ベッド (コンクリート) の上に高さ 1 m のポリエチレンフィルムを張つたフレームがおかれたものである。フレームとベッド枠との間にはゴムパッキングをはさみ、スプリングによつて密着せしめ内部の空気が洩れないようにした。育成箱内の CO₂ 濃度の調節はガスボンベから一定量の炭酸ガスがフレームの一端まで送られ、そこに取付けられたシロッコファンによつて空気を攪拌し、規定の濃度とした後、フレーム内に送り込まれた。フレームの他端には排気口があり、常に流入量に等しい量の空気が排出されるようにした。夏期の内部温度の上昇抑制の問題もあつて、フレームの換気回数は 1 時間に約 30 回とした。CO₂ の処理時間は 8 時から 16 時までとし、タイムスイッチでガスボンベに取付けられた電磁弁を操作した。この様な育成箱を 4 基用い、外気をそのまま育成箱の中に吹き込んだものを対照区とした。試験区は 900, 1,500, および 6,000 ppm の 3 区つくつた。またそれぞれのベッドを 30cm×80cm=2,400cm² の 4 区に仕切り、各仕切りに栽植密度をかえて作物を植え、この仕切りとベッドの外枠との間には周辺効果を考え捨て植えを行なつた。

草丈約 6 cm になつたフダンソウ小葉種 (*Beta vulgaris* Linn var. *flavescens* D. C.) を各区の 4 仕切りにそれぞれ、12, 30, 80 および 120 本ずつ植えた。これを 1 m² 当りの栽植密度に換算すると 50, 120, 334 および 500 本になる。試験栽培は 1965 年 6 月 11 日より 30 日間行なつた。なお礫耕法にて栽培を行い、培養液は Hoagland 標準液を用いた。

2. 実験結果

a 栽培密度と乾物重との関係

CO₂ 処理 1 カ月後の乾物重と CO₂ 濃度・栽植密度との

Fig. 1. Dependence of dry weight of leaf beet on carbon dioxide concentration and plant density.

関係を Fig. 1 に示す。ここにいう乾物重とはベッド面積 1 m^2 当りに換算した値である。1本当りの乾物重は密度が高くなると小さくなるが、単位面積当りの収量としては密度の高い方が多くなっている。またそれぞれの栽植密度が移時植と異つているのは、調査時に個体数が少なくなつていたので、その理由は詳らかでないが、 CO_2 濃度が高くよく繁茂した区など個体数が減少していることは興味深く、一種の Competition とも考えられる。

対照区は過去の多くの研究に見られるごとく、栽植密度の増加とともに単位面積当りの乾物重は増加し、密度約200本/ m^2 から略一定となつて plateau 現象を示している。

CO_2 処理区では濃度に応じて顕著な乾物重の増加を示しているが、ここでは栽植密度との関係についてのみ述べることにする。

CO_2 処理区では栽植密度を増しても容易に plateau 現象はあらわれず、しかも CO_2 濃度を増せば増すほどその曲線は立つて、乾物重は一定値となり難くなり、この実験で最も高濃度であつた 6,000 ppm 区では 400本/ m^2 でも飽和密度とはならず、飽和点は更に高いことを示している。ただここで言う栽植密度とは単に単位面積当りの植物個体数であり、繁茂度と直接には関係しないので、繁茂度の一表現方法である葉面積指数 (L A I) によつて比較することとした。L A I の測定に Leaf puncher を用いたが、操作が予想外に手間どり、其の間の蒸散量が一定でなかつたためか、その結果は不揃いであつたので、栽植密度と L A I との関係図を求め、その平滑曲

線から各区の値を求めた。これを Fig. 1 に併記した。同一栽植密度でも CO_2 濃度が高いほど L A I は大きくなり、例えば L A I が7となるのは、300 ppm 区では栽植密度が 400本/ m^2 であるに対し、6,000 ppm 区では 200本/ m^2 で7の密度である。このことは当然考えられることではあるが、 CO_2 処理が収量に大きく影響しているかがわかる。また L A I の値が等しくても CO_2 濃度の高い区ほど乾物重が大きくなっているが、これは葉厚が大きくなっていることを示すものであろう。したがつて CO_2 処理により葉面積のみならず、葉厚にも効果を示していることがわかる。

次に極めて興味ありまた重要な点は、対照区では L A I が6になるとほぼ乾物重は一定になり plateau 現象を示しているが、この値は従来 イネとか テンサイなどで求められている値に略等しいが、 CO_2 濃度を増すと前述のごとく L A I は大きくなつても、plateau 現象は現われ難くなることである。700 ppm 区では L A I が約8で飽和しているが、6,000 ppm 区では8でも未だ飽和せず、なお高密度・高葉面積指数でも生産は高まることを示している。既に述べた栽植密度と CO_2 効果との関係と重複するようであるが、L A I との関係は重要なことと考える。

b 栽植密度と生育層による日射量の吸収

同一の栽植密度でも CO_2 濃度によつて L A I は異なり、また等しい L A I でも CO_2 濃度によつて乾物重が異つている。この様な場合日射が生育層で吸収されて地上に達する量、すなわち透過率は当然異なるものと考えられる。そこで透過率を測定し区間差を調べた。

生育層内は葉・葉柄など極めて密なため、小型の日射計でも大き過ぎて測定困難であつたので、この測定においては太陽電池を用いた。(小松・ホフマン社製) 大きさは $8\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ のものであつた。入射光のスペクトル分布と生育層下面での透過光のスペクトル分布は異つているから、この太陽電池の波長感度特性より、測定された透過率は実際の値より僅かながら大きい値を示しているものと考えられるが、このための区間の相対的透過率の誤差はほとんどないものと考えてよからう。Fig. 2 に最終調査日の前日における各区の透過率を掲げる。当然のことではあるが、栽植密度が大きくなると透過率は急速に小さくなり、200本/ m^2 以上の密度になると緩やかになり、ほぼ栽植密度に比例し、直線的に小さくなつて行く傾向にある。これを CO_2 濃度別に見ると、栽植密度が小さい場合は、当然ながら低濃度区の透過率は大きく、生育層での吸収が少なくなつており、高濃度区にくおいては透過率は小さく、吸収率が大きくなっている。し

Fig. 2. The transmissivities of plant canopies under various carbon dioxide concentrations.

かしこの様な CO_2 濃度による透過率の差も栽植密度が $120\text{本}/\text{m}^2$ 位までで、 $200\text{本}/\text{m}^2$ 位になると各区の透過率の差は判別出来なくなる。値のブレは測定誤差とか区間内のブレによるものと考えられる程度のもとなつてくる。これは栽植密度が $200\text{本}/\text{m}^2$ になると LAI がすでに 6~7 となつているため、生育層での日射吸収率の区間差はほとんどなくなつてくるものと考えられる。

この日射透過率と乾物重との関係も極めて興味深い。すなわち、 CO_2 濃度 300 ppm である対照区では前述のごとく栽植密度 $200\text{本}/\text{m}^2$ 位 (LAI = 6) から乾物重の増加は止み、飽和値に達する。他方 CO_2 処理区においては栽植密度 $200\text{本}/\text{m}^2$ 位になると日射透過率は各区とも差はなくなり、対照区とも略等しくなるにかかわらず、栽植密度とともに乾物重は増加をつづける。そしてこの傾向は CO_2 濃度の高い区ほど顕著に現われている。

以上の事から、群落の生産において栽植密度を高めた場合乾物生産量の飽和は入射エネルギーが制限因子となつてゐるものではなく、 CO_2 の輸送量が一定になつてゐるためと考えられる。

4. 考 察

標準大気の CO_2 濃度である 300ppm 区においては、ある栽植密度から乾物生産量は略一定となるが、 CO_2 濃度を高めると乾物量が一定となる栽植密度が高まり、1,500~6,000ppm の濃度の下では、実験範囲の密度では乾物重が一定となる密度はまだ現われていない。このような精密実験の結果は最初に述べたホーレンソウ、ジュンギクの間引実験の結果をよく説明出来るとともに、間引実験の結果から立てた仮定も満足すべきものであつたと考えられる。すなわち間引実験において標準濃度ハウスに

おいては半分に間引かれた区でも最終調査時にはほぼ plateau の範囲の繁茂度になつていて、その生産量は間引がなかつた区のそれと大きい差は見られなかつたためであろう。他方 CO_2 処理ハウスでは、 CO_2 濃度が略 3,000ppm であつたためまだ plateau は現われず、半分に間引けばほぼその密度に比例した割合で乾物量があつたものと考えられる。すでに述べたので重複するが、生育層内で入射エネルギーの吸収率が一定となるために、ある栽植密度以上からの生育量が一定となると考えるならば、 CO_2 濃度を高めた場合生育量が一定となるいわゆる飽和密度が高くなるという現象は説明困難である。しかもある栽植密度、あるいは LAI のある値以上からは、各区の生育層による入射エネルギー吸収率の差はなくなるにかかわらず、乾物重に大きい差があるということとは従来の説明をさらに不十分なものとする。

このような興味ある結果は群落への CO_2 供給量を多くしたことによつて起つたものであり、繁茂度がある程度大きくなると、光の吸収量が多くなつても自然状態では群落への CO_2 供給量にある限度があり、同化量はほぼ一定となり、plateau 現象を示すものと考えられる。

この植物育成箱はビニールハウス内におかれたため、箱内の入射エネルギーは戸外のその約 50% に過ぎなかつたことから、少なくとも日本の暖期の自然状態においては、群落生産に対し大気あるいは地中からの CO_2 輸送量が重要な制限因子になつてゐると考えられる。

最近確立された空気力学的方法による群葉内への CO_2 拡散の測定結果によつても、大気と群落内との CO_2 濃度差にはある限度があり、また群落上の風速分布からも CO_2 拡散係数にもある限界値を持つてゐることから、 CO_2 の拡散量——同化量にもある一定の限界のあることを示している。また群落内部の風速も $20\text{cm}/\text{sec}$ 程度という低風速であり、内部の拡散係数も非常に小さくなつてゐるなどのこともこの考え方を支持するものと思われる。

この実験結果は CO_2 施用栽培にとつて極めて重要であるが、群落生産についても重要な意義を持つものと考えられる。従来の群落生産にあつては専ら光学系からエネルギー利用率の向上に研究の対象が向けられて来たが、これは CO_2 が生産の制限因子とならない条件下において言うことであり、 CO_2 が群落乾物生産の一つの制限因子となつてゐることが考えられる日本の少くとも暖期においては、生育層内部の CO_2 拡散の問題が検討されなければならぬものと考えられる。

引用文献

- 1) GAASTRA, P., (1959) Meded. Land. Hoogeschool, Wageningen, **59**: 1~68.
- 2) 今津・矢吹・織田, (1965) 農業気象, **21**: 41~46.
- 3) 井上・谷・今井・磯部, (1958) 農業気象, **12**: 121~.
- 4) INOUE, E., (1963) J. Met. Soc. of Japan, **41**: 317~326.
- 5) 吉良竜夫 (1961) 農業及園芸, **36** (7~9).
- 6) LEMON, E.R., (1961) Agron. J., **52**: 197.
- 7) MONTEITH, J. and G. SZEICZ, (1960) Q. J. R. M. **86**: 205,
- 8) SAEKI, T., (1960) Bot. Mag. **73**: 55.
- 9) 武田京一, (1964) 農業気象, **20**: 1.
- 10) ———, (1965) 農業気象, **21**: 11.
- 11) 武田友四郎, (1960) 光合成と子実生産, 農業技術協会版, 稲の形態と機能, 136.
- 12) ———, (1961) 日作紀, **29**: 31.
- 13) 内島善兵衛, (1966) 農業気象, **22**: 15~20.
- 14) WATSON, D.G., (1952) Advances in Agronomy, **4**: 101.
- 15) 山田登, (1963) 水稻の生態, 養賢堂版, 作物大系, pp. 67~97.

Summary

Dry matter production and plant density relationships of leaf beet plants were examined under a range of carbon dioxide concentrations from 0.03 % to 0.6 % CO₂. Leaf beet plants (*Beta vulgaris* L. var. *flavascens* D. C.) were raised in gravel culture beds in polythin growth chambers from June 11 to July 10, 1965. The carbon dioxide concentrations in four chambers employed in this experiment were 0.03, 0.07, 0.15 and 0.6 %, respectively. The each bed in the chambers was partitioned into four sections and the leaf beet plant with the height of 6 cm were transplanted in these sections at the densities of 50, 125, 292 and 500 plants/m², respectively.

As can be seen in Fig. 1, the dry weight per unit area increased throughout the range of plant density values applied, although the initial increase is more rapid. The increase rate of the dry weight is larger for the chambers with high CO₂ concentrations than for the chamber with usual CO₂ concentration, indicating that the dry weight for the chamber with usual CO₂ concentration is approximately constant in the range of plant densities over 200 plants/m² and LAI 6. On the other hand, the dry weight for the chamber with CO₂ concentration of 0.6 % did not show any saturating values throughout the range of plant density values applied.

The value of absorptivity of incoming solar radiation of the plant canopy was measured for respective plots. The absorptivity decreases throughout the range of plant density values applied, although the initial decrease is more rapid (see Fig. 2.). In the range of plant density over 200 plants/m², no difference in the absorptivities was found among the chambers.

The above results suggest that a principal cause for the plateau phenomenon in photosynthesis is not the limitation of absorption of incoming solar radiation by plant canopy, but the limitation of the supply of carbon dioxide from the atmosphere and soil to plant communities. This proposition is applicable to plant communities with foliage over LAI 6 under summer conditions in Japan.

支部だより

関東支部41年度例会開かる 昭和42年3月2日(13~17時)に気象庁で盛会裡におわつた。

研究発表

1. 南九州における裸地面蒸発量の季節変化について 岩切(防災センター)
2. 土壌の通気性に関する研究(2) 含水量と通気性 森永(東京学芸大)
3. カタ温度計の実験式について 荒井(気象大学校)
4. タイ国の米作と気象 丸山(気象庁)
5. 果樹の晩霜害危険度の地域差に関する農業気候学的調査 高谷(気象庁)
6. 前橋営林局管内の寒害面積と冬季の降水量との関

- 係 岡上(林試)
7. ハケ岳地域の局地風, とくにシマ枯現象について 中原・岡田(千葉大)
 8. 作物群落内におけるエネルギーならびにガス交換に関する研究(1) トウモロコシ群落の放射状態について 宇田川・内島・堀江・小林(農技研)
 9. (2) トウモロコシ群落内の微気候環境の生育に伴う変化 内島・宇田川・堀江・小林(農技研)
 10. ハウスの fog 冷房法について 太巻・三原・中原・相原(千葉大)
- その他 経過報告・決算報告がなされた。役員改選の結果の報告があつた。